

# ГЕОПОЛИМЕРИ НА БАЗИ АЛКАЛНО АКТИВИРАНОГ ЕЛЕКТРОФИЛТЕРСКОГ ПЕПЕЛА КАО НОВО ВЕЗИВО У БЕТОНУ

## ALKALI ACTIVATED FLY ASH GEOPOLYMERS AS A NEW BINDER IN CONCRETE

УДК: 669.613.11:666.972.16

Оригинални научни рад

Јелена ДРАГАШ, дипл. грађ. инж.<sup>1)</sup>

Проф. др Снежана МАРИНКОВИЋ, дипл. грађ. инж.<sup>1)</sup>

Љиљана МИЛИЧИЋ дипл. хем.<sup>2)</sup>

Др Смиља МАРКОВИЋ, дипл. физ.-хем.<sup>3)</sup>

Никола ТОШИЋ, дипл. грађ. инж.<sup>1)</sup>

Мр Иван ИГЊАТОВИЋ, дипл. грађ. инж.<sup>1)</sup>

### РЕЗИМЕ

У складу са растућом бригом за заштиту животне средине и потребом развоја одрживог грађевинарства, јавља се и веће интересовање за истраживања у области нових материјала, који ће користити отпадне сировине и имати мањи утицај на животну средину. У овом раду анализирани су карактеристике електрофилтерског пепела из термоелектране „Никола Тесла Б“ у Обреновцу и могућност његове примене у геополимерима на бази алкално активираних електрофилтерског пепела, као новог везива за бетон. Вршена су експериментална испитивања гранулометријског и хемијског састава пепела, као и уградљивости и чврстоће при притиску узорака направљених од геополимер пасте са различитим односом воденог стакла и натријум-хидроксида као алкалних активатора. Резултати истраживања показују да се пепео из термоелектране „Никола Тесла Б“ може употребити као везиво у геополимерима са воденим стаклом и натријум-хидроксидом, као алкалним активатором уз негу загревањем на 80°C у одређеном временском периоду.

**Кључне речи:** електрофилтерски пепео, алкална активација, геополимери, пасте, чврстоћа при притиску.

### SUMMARY

As the concern for the environment and need for sustainable construction practice continues to grow, research in the field of new materials made with waste materials which have a lower impact on the environment is gaining wide interest. This paper analyzes the characteristics of fly ash from power plant „Nikola Tesla B“, and its applications in alkali activated fly ash geopolymers as a new binder in concrete. Testing of the particle size distribution and chemical composition of fly ash has been done, as well as the testing of workability and compressive strength of geopolymer pastes under different ratios of water glass and sodium hydroxide. The results show that fly ash from power plant „Nikola Tesla B“ can be used as a binder in alkali activated fly ash geopolymers made with water glass and sodium hydroxide as alkali activators cured on 80°C a certain period of time.

**Key words:** fly ash, alkali activation, geopolymers, paste, compressive strength.

## 1. УВОД

Свет се данас суочава са проблемом депоновања великих количина чврстих отпадних материја.

Адресе аутора: <sup>1)</sup> Универзитет у Београду, Грађевински факултет, 11000 Београд, Булевар краља Александра 73

E-mail: jelenad@imk.grf.bg.ac.rs; sneska@imk.grf.bg.ac.rs; ntosic@imk.grf.bg.ac.rs; ivani@imk.grf.bg.ac.rs

<sup>2)</sup> Институт за испитивање материјала, 11000 Београд, Булевар војводе Мишића 43

E-mail: ljiljana.milicici@institutims.rs

<sup>3)</sup> Институт техничких наука САНУ, 11000 Београд, Кнез Михаила 35

E-mail: smilja.markovic@itn.sanu.ac.rs

Један део проблема је електрофилтерски пепео, који се јавља као нуспродукт сагоревања угља у термоелектранама. Већи део електричне енергије у Србији (73.48% према подацима из 2011. године [1]), производи се у шест термоелектрана које углавном сагоревају лигнит. Током 2011. године, произведено је око 40 милиона тона угља из рударских басена Колубара и Костолац. Као последица сагоревања угља при производњи електричне енергије, у термоелектранама у Србији направи се годишње око шест милиона тона електрофилтерског пепела, од чега се највећи део произведе у термоелектранама „Никола Тесла А“ и

„Никола Тесла Б“ у Обреновцу. У Србији је тренутно депоновано око 200 милиона тона електрофилтерског пепела, на површини од 1500 хектара. Ове депо није се налазе у близини термоелектрана и покривају значајне површине, најчешће обрадивог, земљишта. У термоелектрани „Никола Тесла Б“ у Обреновцу је, током ремонта 2009/2010. године, успостављен нови систем сакупљања, транспорта и одлагања пепела. Применом нове технологије омогућено је сакупљање сувог пепела у силосима, спремног за његову испоруку за потребе индустрије. Ради лакшег транспорта пепела, прво се врши гравитационо одвајање песка из пепела, а остатак се затим раздваја на четири групе према величини зрна. Од укупне количине пепела, грађевинска индустрија у Србији користи само 2.7%. У највећој мери је то цементна индустрија, која користи електрофилтерски пепео као додаток цементу. Како би се смањило проблем велике количине електрофилтерског пепела, спроводе се истраживања у циљу проналажења његове примене у разним гранама индустрије.

Цементна индустрија је одговорна за емисију најмање 5-7% укупног угљен-диоксида ( $\text{CO}_2$ ) у атмосферу [2]. До емисије угљен-диоксида ( $\text{CO}_2$ ) у цементрама долази због самог процеса добијања оксида калцијума из кречњака (око 60%) и услед високих температура, потребних за одвијање ових процеса (око 40%). Већи део емисије гасова је, дакле, саставни део хемијског процеса добијања цемента, па се може избећи само радикалном променом начина производње везивних материјала. Смањење емисије угљен-диоксида је могуће применом нових материјала, који ће имати сличне карактеристике као цементни бетони, али са мање штетних утицаја по околину. Постоје алтернативе цементним бетонима које су претходних деценија привукле пажњу широм света, али још увек нису нашле комерцијалну примену. Једна од њих су алкално активирани материјали.

Везивна компонента ових материјала (електрофилтерски пепео, згура, метакаолин, силикатна прашина...) састоји се од калцијума у малим количинама и алумино-силикатне структуре ( $\text{Si-O-Al}$ ), која реагује са алкалијама (натријум или калијум-хидроксид, натријум-карбонат...) и формира структуру сличну зоолитима која се разликује у нивоу кристализације [3]. Средином 50-их година прошлог века, услед захтева за развијањем алтернативних везивних материјала и бетона, *Glukhovsky* [4] је започео истраживања везивних материјала који су коришћени још у античком Египту и Риму и развио ново везиво на бази различитих типова згуре, које је, од средине 60-их година, почело да се користи у изградњи стамбених и других објеката у Украјини. Крајем 70-их година француски научник *Davidovits* [5, 6] уводи термин геополимери (*geopolymers*) који се односи на алкално активирани метакаолин. Термин геополимери се данас користи за подгрупу алкално активираних материјала алумино-силикатне структуре са малим процентом калцијума, који не утиче на стварање C-S-H

структуре која се јавља код цементних везива, а процес њихове синтезе се назива полимеризација [6]. Последњих деценија су вршена испитивања могуће примене електрофилтерског пепела као новог везива у бетонима које се добија његовом активацијом [7,8].

Истраживања која су до сада извршена у свету са геополимер пастама и бетонима са алкално активираним електрофилтерским пепелом, показују да постоји велики потенцијал за комерцијалну примену ових бетона [7]. Према тим истраживањима, на квалитет везивног материјала тј. пасте, утичу врста електрофилтерског пепела, односно његов гранулометријски и хемијски састав. Најбољи резултати се добијају са електрофилтерским пепелом који имају низак проценат калцијума (нижи од 10%), а висок проценат силицијума и алуминијума [9] ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$ ) и припада класи F према стандарду ASTM C618-12 [10].

Геополимер пасте са алкално активираним електрофилтерским пепелом настају током процеса полимеризације, при растварању алумино-силикатне структуре електрофилтерског пепела у јакој алкалној средини. Овим растварањем настаје гел који, након реорганизације, прелази у кристалну структуру. До овог растварања долази одмах након контакта између електрофилтерског пепела и јаког алкалног раствора високе рН вредности (око 14). Да би се, у највећој мери, остварио процес полимеризације и стварања везивне структуре, потребна је нега геополимер пасте и бетона на повишеним температурама.

На физичка и механичка својства везива са алкално активираним електрофилтерским пепелом утиче много параметара: гранулометријски и хемијски састав самог пепела, тип и концентрација алкалних активатора, одређена температура и трајање неге геополимер пасте и бетона [11, 12, 13, 14]. Гранулометријски састав електрофилтерског пепела је један од најбитнијих параметара. Како би се постигла оптимална својства геополимера са алкално активираним електрофилтерским пепелом, потребно је да пепео има што већи проценат честица мањих од  $45\mu\text{m}$  (више од 80-90%) [7]. Битан параметар који негативно утиче на активирање пепела је и проценат несагорелог угља, који треба да је нижи од 5% [7]. Тип и количина алкалног активатора је, поред врсте електрофилтерског пепела, представља пресудан фактор од утицаја на активирање пепела. Процент оксида натријума и силицијума, као и њихов однос у алкалном активатору, параметри су које треба анализирати при одабиру активатора.

Да би се повећао интензитет активирања пепела у геополимерима, потребно је да се загревају на повишеним температурама. Више температуре (од  $30^\circ\text{C}$  до  $90^\circ\text{C}$ ) неге резултују њиховим вишим чврстоћама. Дужина неге је још један параметар који утиче на чврстоће геополимера. Дуже време загревања (од шест до 96 сати) доводи до већих чврстоћа, али је њихов прираст врло мали за загревање дуже од 96 сати [15]. Слично као и код цементних бето-

на, више температуре неге, доводе до већег прираста раних чврстоћа и код геополимер бетона. Даљи прираст чврстоће након завршене температурне неге је мали [15].

Предност геополимера у односу на цементна везива је већа трајност. Испитивања су показала да је отпорност геополимера на дејство киселина, сулфата и мрза већа него код цементних бетона [16].

## 2. СОПСТВЕНА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

У циљу анализе могућности примене електрофилтерског пепела из термоелектране „Никола Тесла Б“, као сировине за производњу геополимер бетона, извршено је експериментално истраживање обрадљивости пасти и чврстоће при притиску очврслих узорка, добијених алкалном активацијом електрофилтерског пепела. Истраживања су вршена на коцкама странице 4 cm, а за сваку мешавину и одговарајућу температуру и дужину неге направљено је по три узорка.

### 2.1. Материјали

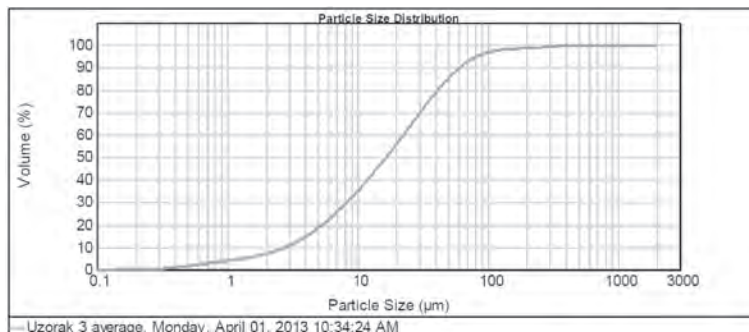
Током експеримента анализирани су карактеристике узорка са две класе електрофилтерског пепела из термоелектране „Никола Тесла Б“, означених са ЕФП-3 и ЕФП-4. У табели 1 приказан је хемијски састав обе класе пепела. Хемијска анализа извршена је XRF-методом у Институту за испитивање материјала ИМС, Београд.

Табела 1. Резултати хемијске анализе узорка пепела ЕФП-3 и ЕФП-4 XRF методом (масени %)

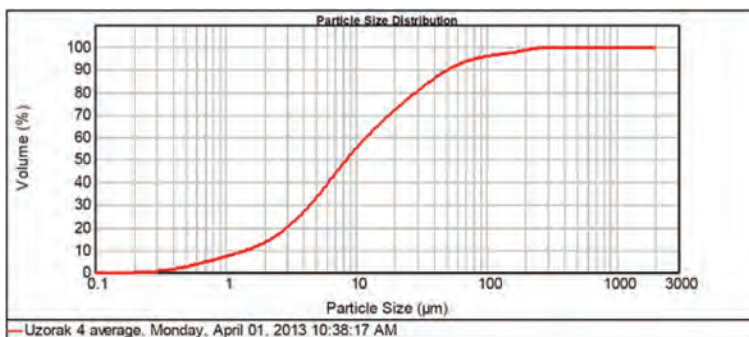
Оксиди (%)	ЕФП – 3	ЕФП – 4
SiO <sub>2</sub>	57.38	58.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.47	20.23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.89	5.33
TiO <sub>2</sub>	0.60	0.45
CaO	10.05	7.62
MgO	1.58	2.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.00
SO <sub>3</sub>	1.48	2.21
Na <sub>2</sub> O	0.53	0.52
K <sub>2</sub> O	1.89	1.51
MnO	0.03	0.03
ГПЖ (%)	1.65	1.64

\*ГПЖ-губитак при жарењу

Гранулометријска расподела величине честица електрофилтерског пепела одређена је на уређају Malvern Instruments Mastersizer 2000. верзија 5.54 у Институту техничких наука САНУ, Београд. На сликама 1 и 2 приказане су кумулативне расподеле ве-



Слика 1. Кумулативна расподела величине честица узорка електрофилтерског пепела ЕФП-3



Слика 2. Кумулативна расподела величине честица узорка електрофилтерског пепела ЕФП-4

личине честица узорка електрофилтерског пепела ЕФП-3 и ЕФП-4.

Запреминске масе пепела су утврђена према стандарду за пепео EN450-1:2010 [17] у Институту за испитивање материјала ИМС и добијене су вредности: 1960 kg/m<sup>3</sup> за пепео ЕФП-3, и 2020 kg/m<sup>3</sup> за пепео ЕФП-4.

У експерименту су, као алкални активатори, коришћени водено стакло односно натријум-силикат (NaSiO<sub>3</sub>) и натријум-хидроксид (NaOH). Водено стакло, Na<sub>2</sub>O·n·SiO<sub>2</sub> је модула n = SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O = 1.91, густине (на 20°C) ρ = 1.514 g/cm<sup>3</sup>, са 14.7% Na<sub>2</sub>O и 28.1% SiO<sub>2</sub>, произвођача Galenika-Magmasil, Србија. Како бисмо анализирали утицај концентрације раствора натријум-хидроксида на механичке карактеристике пасти, направљени су раствори концентрације 10М и 16М (М је моларна маса преко које је представљена концентрација раствора натријум-хидроксида), растварањем гранула натријум-хидроксида (р.а. 99%, Superlab, Београд) у дестилованој води. Како би се избегао ефекат непознатих примеса које се налазе у води са чесме, коришћена је дестилована вода. Након растварања гранула натријум-хидроксида у дестилованој води, раствори су остављени да се охладе на собној температури (20±2°C), после чега су у одређеном односу помешани са воденим стаклом. Активатори су припремљени 24 сата пре прављења геополимер пасти. Током тог времена, чувани су на собној температури у затвореним пластичним посудама које су отпорне на дејство јаких база као што

је натријум-хидроксид. Да би се одредио утицај односа воденог стакла и натријум-хидроксида на обрадљивост пасти и чврстоћу при притиску очврслих узорака, варирани су различити масени односи воденог стакла и натријум-хидроксида у активатору и то:  $n = 2, 3.5, 5$  и  $10$ . Измерена рН вредност припремљених активатора је  $15$ .

Пасте за узорке су направљене са додатком суперпластификатора Glenium 690, BASF, Србија.

## 2.2. Припрема узорака

Сви узорци су направљени у односу алкалног активатора (АА) и електрофилтерског пепела (ЕФП) АА/ЕФП =  $0.6$  са додатком суперпластификатора од  $0.3\%$ , у односу на масу електрофилтерског пепела.

Припрема пасти за узорке је вршена по узору на стандард за испитивање цементних малтера SRPS EN196-1:2008 [18], уз неопходне модификације. Коришћена је специјална мешалица RILEM-CEM. Усвојена је следећа процедура добијања пасти:

1. У миксер се сипа раствор активатора, затим се дода електрофилтерски пепео.

2. После  $30$  секунди мрвања, меша се меша  $30$  секунди првом брзином ( $140 \pm 5$  обртаја у минути).

3. Миксер се гаси на  $30$  секунди, када треба уклонити сву пасту која се залепила за зидове посуде и ставити је на средину посуде.

4. Наставља се мешање другом брзином ( $285 \pm 10$  обртаја у минути) још  $90$  секунди. Где се на почетку овог мешања додаје суперпластификатор у посуду за мешање.

Паста је уграђена у калупе, димензија  $4 \times 4 \times 4$  cm, са збијањем на вибро столу, два пута по  $10$  секунди како би се добила хомогена маса. Након уградње, узорци су заштићени пластичном фолијом како би се спречио губитак воде услед испаравања.

Да бисмо испитали утицај неге на развој чврстоће узорака при притиску пасти са алкално активираним електрофилтерским пепелом, узорци су неговани на температури од  $80^\circ\text{C}$  у грејној комори, једне серије шест и друге  $24$  сата. Након тога, узорци су остављени на собној температури до испитивања. Параметар који је такође од утицаја и који треба анализирати је и температура неге. У овом испитивању овај параметар није анализиран, већ је усвојена температура од  $80^\circ\text{C}$ .

Узорци су испитивани у преси Amsler капацитета  $200$  kN за испитивање чврстоће малтера,  $48$  сати након њиховог спрвања.

## 3. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА

У табели 2 је приказан састав шеснаест мешавина пасти са алкално активираним електрофилтерским пепелом. Првих осам мешавина (ознаке 3.1 до 3.8) су направљене са пепелом ЕФП-3, а других осам (ознаке 4.1 до 4.8) са пепелом ЕФП-4.

Табела 2. Мешавине пасти са алкално активираним електрофилтерским пепелом

	АА / ЕФП	NaOH	*n	Na <sub>2</sub> O / ЕФП	SiO <sub>2</sub> / Na <sub>2</sub> O
Узорак	(-)	(M)	(-)	(%)	(-)
3.1	0.6	10	2	8.98	1.25
3.2	0.6	10	3.5	8.93	1.47
3.3	0.6	10	5	8.9	1.58
3.4	0.6	10	10	8.86	1.73
3.5	0.6	16	2	10.38	1.08
3.6	0.6	16	3.5	9.86	1.33
3.7	0.6	16	5	9.6	1.46
3.8	0.6	16	10	9.25	1.66
4.1	0.6	10	2	8.98	1.25
4.2	0.6	10	3.5	8.93	1.47
4.3	0.6	10	5	8.9	1.58
4.4	0.6	10	10	8.86	1.73
4.5	0.6	16	2	10.38	1.08
4.6	0.6	16	3.5	9.86	1.33
4.7	0.6	16	5	9.6	1.46
4.8	0.6	16	10	9.25	1.66

\* n је масени однос воденог стакла (NaSiO<sub>3</sub>) и раствора натријум-хидроксида (NaOH)

У табели 2 дат је такође и масени однос оксида натријума и електрофилтерског пепела (Na<sub>2</sub>O/ЕФП), као битан параметар који утиче на активирање пепела [19]. При томе, проценат оксида натријума у активатору зависи од количине и концентрације натријум-хидроксида и воденог стакла. Још један битан параметар који је разматран је однос оксида силицијума и натријума (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) у активатору, такође приказан у табели 2. Силицијум диоксид потиче из воденог стакла, а оксид натријума је збир одговарајуће количине из натријум-хидроксида и воденог стакла.

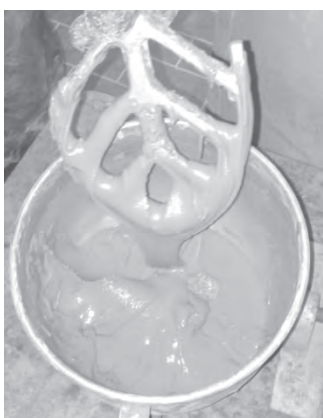
Обрадљивост мешавине пасти направљених са пепелом ЕФП-3 и ЕФП-4 се битно разликује. На сликама 3 и 4 приказани су припремљени узорци пасти 3.3 и 4.3, које се међусобно разликују само по класи пепела.

Обрадљивост свих узорака са пепелом ЕФП-3 после мешања је слична обрадљивости пластелина. Због мале обрадљивости, узорци су са тешкоћом уграђени у калупе. Примећено је да је обрадљивост узорака припремљених са раствором натријум-хидроксида  $10\text{M}$  боља него са  $16\text{M}$ , због мање густине и већег процента воде раствора концентрације  $10\text{M}$ . Обрадљивост узорака припремљених са пепелом ЕФП-4 је боља него узорака са пепелом ЕФП-3 и слична је обрадљивости меда. Уградљивост ових узорака је добра. Може се закључити да обрадљивост узорака пасти зависи од гранулометријског састава и запреминске масе пепела. Пепео ЕФП-4 има мање средње зрно него пепео ЕФП-3 а већу запреминску масу, и као последицу тога битно бољу обрадљивост узорака пасти.





Слика 3. Припремљена мешавина – узорак 3.4



Слика 4. Припремљена мешавина – узорак 4.4

Узорци су направљени према претходно описаној процедури мешања и рецептури, и испитани су након 48 сати од справљења. У табели 3 су дати резултати испитивања чврстоће при притиску свих узорака након неге од шест и 24 сата. Чврстоћа при притиску узорака пасти при температури од 80°C је одређена као средња вредност три испитана узорка.

Табела 3. Резултати испитивања чврстоће при притиску

Узорак	6h (MPa)	24h (MPa)
3.1	40.78	44.53
3.2	47.66	45.63
3.3	45.00	48.00
3.4	45.31	46.96
3.5	42.00	48.00
3.6	48.75	48.59
3.7	45.94	48.13
3.8	50.94	55.16
4.1	57.11	54.30
4.2	49.22	53.91
4.3	55.31	56.88
4.4	59.69	56.95
4.5	-	-
4.6	53.91	60.16
4.7	58.83	59.92
4.8	65.42	75.63

Мешавина за узорке 4.5, са највећим процентом  $\text{Na}_2\text{O}$  од 10.38 %, није могла да се угради у калупе због веома лоше обрадљивости. Процес везивања је почео одмах по завршетку мешања и након неколико минута паста је постала потпуно необрадљива. Ови узорци стога нису ни испитани.

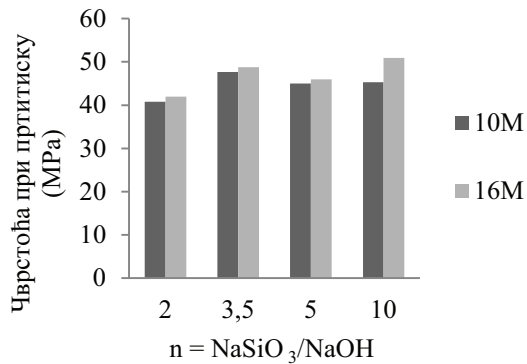
### 3.1. Анализа резултата испитивања

Циљ ових испитивања била је анализа параметара који утичу на чврстоћу при притиску узорака пасти са алкално активираним електрофилтерским пепелом.

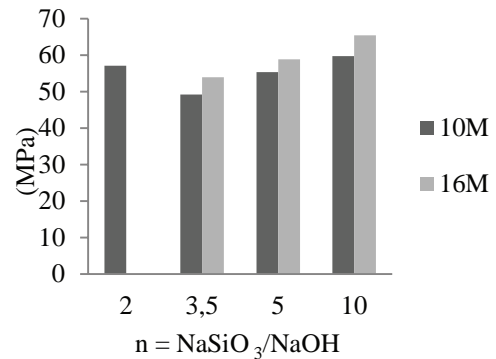
Као први параметар, анализиран је утицај дужине неге пасти на температури од 80°C. На основу закључака из литературе [15], усвојено је време неге од 24 сата, али и време неге од шест сати које одговара стандардном процесу запаривања префабрикованих бетонских елемената. Може се закључити да се добија повећање чврстоће при притиску, са повећањем дужине неге са шест сати на 24 сата. Вредности приказане у табели 3 су средње вредности три испитана узорка, а у мешавинама 3.2, 3.6, 4.1 и 4.4 чврстоћа при притиску су мање за време неге од 24 сата. Код неких узорака, ово је последица тога што нису добро уграђени, па су се у њима јавили већи мехури ваздуха, док код других то може бити и последица неког недовољно јасног процеса који се одвија током неге узорака. Повећање чврстоће при притиску узорака изложених температури од 80°C у трајању од 24 сата у односу на узорке који су загревани шест сати, за обе врсте пепела, износи највише 15%. Током процеса загревања утрочи се одређена количина енергије, што утиче негативно и на цену производа. Имајући све ово у виду, за ову класу пепела је економски и еколошки прихватљивије загревање од шест сати. Прираст чврстоће није довољно велики да оправда загревање од 24 сата.

На основу резултата испитивања приказаних у табели 3, види се да су чврстоће при притиску свих мешавина, за оба периода неге, веће за мешавине са пепелом ЕФП-4 и до 40%. На основу овога се може закључити да су гранулометријски састав, запреминска маса и хемијски састав пепела, битни параметри који утичу на чврстоћу узорака при притиску. Хемијски састав пепела се разликује у томе што пепео ЕФП-4 има нешто повољнији однос оксида силицијума и алуминијума [20, 21], ЕФП-3:  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.11$ , ЕФП-4:  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2.88$ . Још један параметар од утицаја је проценат оксида калцијума у пепелу [7]. И са тог аспекта је пепео ЕФП-4 повољнији, јер га има у мањој количини (ЕФП-3:  $\text{CaO} 10.05\%$ , ЕФП-4:  $\text{CaO} 7.62\%$ ).

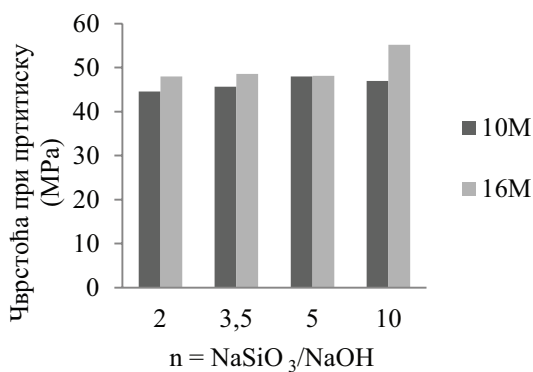
Следећи параметри који су анализирани су тип и концентрација раствора активатора. На сликама 5 – 8 дати су дијаграми зависности чврстоће при притиску испитаних узорака пасти од концентрације, односно моларности раствора натријум-хидроксида и односа воденог стакла и натријум-хидроксида у раствору активатора –  $n = \text{NaSiO}_3/\text{NaOH}$ .



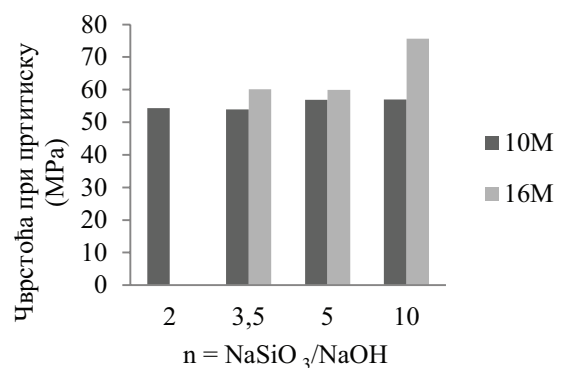
Слика 5. Зависност чврстоће при притиску пасте од пепела ЕФП-3 од параметра  $n$  при нези од шест сати на температури од  $80^{\circ}\text{C}$



Слика 7. Зависност чврстоће при притиску пасте од пепела ЕФП-4 од параметра  $n$  при нези од шест сати на температури од  $80^{\circ}\text{C}$



Слика 6. Зависност чврстоће при притиску пасте од пепела ЕФП-3 од параметра  $n$  при нези од 24 сата на температури од  $80^{\circ}\text{C}$



Слика 8. Зависност чврстоће при притиску пасте од пепела ЕФП-4 од параметра  $n$  при нези од 24 сата на температури од  $80^{\circ}\text{C}$

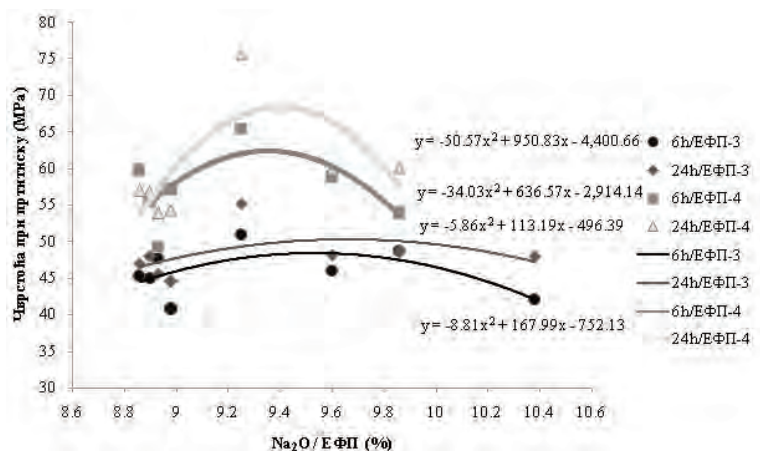
На дијаграмима се види да је чврстоћа при притиску већа при већој концентрацији натријум-хидроксида (16М) и при већем параметру  $n$ , за обе класе пепела и оба трајања неге. На основу овога се може закључити да се, веће чврстоће при притиску, добијају са већим процентом натријума и силицијума у раствору активатора. Да би боље разумели ове утицаје, анализиран је однос оксида натријума у раствору активатора и електрофилтерског пепела ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{ЕФП}$  %) и однос оксида силицијума и натријума у раствору активатора ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ). На сликама 9 и 10 приказана је зависност чврстоће при притиску од ова два параметра.

Са дијаграма на слици 9 се види да се зависност чврстоће при притиску узорака од односа оксида натријума и електрофилтерског пепела може апроксимирати функцијом која има максимум у околини тачке 9.5%. То је у складу је са резултатима експерименталних испитивања из литературе [19].

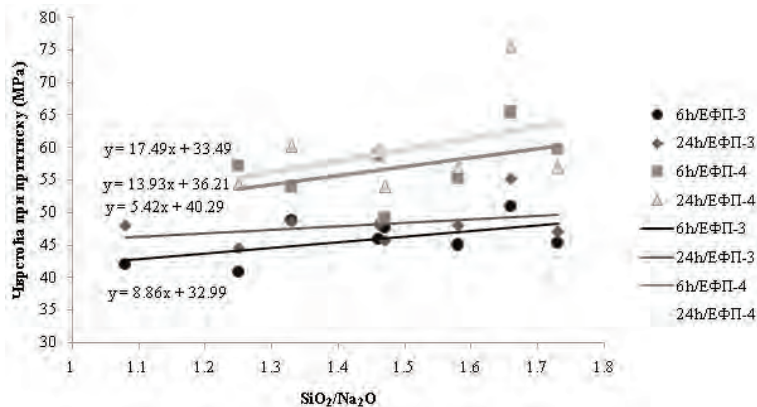
Са слике 10 се примећује благ прираст чврстоће са повећањем овог односа, односно позитиван утицај количине силицијума у активатору на чврстоћу при притиску узорака.

#### 4. ЗАКЉУЧАК

Циљ овог испитивања је анализа применљивости електрофилтерског пепела из термоелектране „Никола Тесла Б“, као новог везивног материјала за геополимере на бази електрофилтерског пепела. Анализом резултата сопствених експерименталних



Слика 9. Зависност чврстоће при притиску узорака  $4\times 4\times 4\text{cm}$  са пепелом ЕФП-3 и ЕФП-4 од односа оксида натријума у раствору активатора и масе електрофилтерског пепела



Слика 10. Зависност чврстоће при притиску узорака пасте са пепелом ЕФП-3 и ЕФП-4 од односа  $SiO_2$  и  $Na_2O$  у раствору активатора

истраживања дошло се до закључка да следећи параметри утичу на обрадљивост и чврстоћу при притиску узорака геополимера:

– Узорци пасте направљени са електрофилтерским пепелом ЕПФ-4 имају бољу обрадљивост и веће чврстоће при притиску. Узорци пепела ЕПФ-4 имају мање средње зрно ( $8.533 \mu m$ ) од узорка пепела ЕПФ-3 ( $16.775 \mu m$ ) што битно утиче на квалитет пепела као сировине за производњу геополимера.

– Утицај трајања неге при температури од  $80^\circ C$  на чврстоћу при притиску није од пресудног значаја. Резултати су показали да је прираст чврстоће при нези од 24 сата до 15% у односу на негу од шест сати.

– Количина и тип активатора су битни параметри који утичу на обрадљивост и чврстоћу при притиску узорака. Мешавине са већом концентрацијом натријум-хидроксида и већом количином воденог стакла, дају нешто мању обрадљивост пасте за узорке и битно веће чврстоће при притиску.

– Процент оксида натријума у односу на масу електрофилтерског пепела од око 9.5%, даје највеће чврстоће при притиску узорака.

– Већа количина силицијума у активатору позитивно утиче на развој чврстоће при притиску. Та чврстоћа линеарно расте са порастом количине силицијума.

Истраживања понашања геополимера су још увек на почетку, али су знатно интензивирани у претходној деценији. Због великог утицаја састава и својстава електрофилтерског пепела, који је другачији у свакој термоелектрани, поређење резултата експерименталних истраживања између различитих земаља је тешко. Поред битних параметара који утичу на физичка и механичка својства узорака геополимера, мора се анализирати и њихов економски и еколошки утицај. Током избора активатора, температуре и дужине неге, мора се узети у обзир количина и врста штетних материја које се емитују при производњи натријум-хидроксида и воденог стакла и њихов утицај на животну средину [22]. На комерцијалну свакодневну примену геополимер бетона утиче и њихова цена. Електрофилтерски пепео се сматра

неопасним отпадом, и као такав има ниску цену. Натријум-хидроксид и водено стакло највише утичу на цену геополимера. Са масеним односом активатора и електрофилтерског пепела од 0.6, цена геополимер бетона би била 10% већа него цементног бетона при истим чврстоћама при притиску. Међутим, предности геополимера (смањење количине отпада, очување природних сировина, побољшана трајност и евентуално смањење емисије  $CO_2$ ), јесу довољна мотивација да се наставе испитивања геополимер бетона и у нашој земљи. Резултати овог, почетног, истарживања показују да се електрофилтерски пепео из термоелектране „Никола Тесла Б“, може употребити као сировина за производњу геополимера. Потребна су даља свеобухватна истраживања и анализа параметара који утичу на физичка и механичка својства геополимер бетона са алкално активираним електрофилтерским пепелом.

## 5. ЗАХВАЛНОСТ

У раду је приказан део истраживања које је помогло Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у оквиру технолошког пројекта ТР36017 под називом: „Истраживање могућности примене отпадних и рециклираних материјала у бетонским композитима, са оценом утицаја на животну средину, у циљу промоције одрживог грађевинарства у Србији“.

## 6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Годишњи извештај Електропривреде Србије 2011* ([http://www.eps.rs/GodisnjiIzvestaji/Godisnjak%20EPS%202011\\_sr\\_web.pdf](http://www.eps.rs/GodisnjiIzvestaji/Godisnjak%20EPS%202011_sr_web.pdf)), Приступљено 29. августа 2013.
- [2] McLellan B.C., Williams R.P., Lay J., Van Reissen A., Corder G.D., Cost and carbon emissions for Geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, *J. Clean. Prod.*, 19:1080–1090, 2011.
- [3] Fernandez-Jimenez A., Palomo A., Alkaline activation of fly ashes. Manufacture of concretes not containing Portland cement, *International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures*, Barcelona, 2004.
- [4] Glukhovskiy V.D., Ancient, modern and future concretes, In: *Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, pp. 1–9, VIPOL Stock Company, Kiev, Ukraine, 1994.
- [5] Roy Della M., Alkali-activated cements. Opportunities and challenges, *Cement Concrete Res.*, 29: 249–54, 1999.
- [6] Davidovits J., The need to create a new technical language for the transfer of basic scientific information, In: *Gibb, J.M., Nicolay, D. (eds.)*

Transfer and Exploitation of Scientific and Technical Information, EUR 7716, pp. 316–320. Commission of the European Communities, Luxembourg, 1982.

- [7] Palomo A., Grutzeck M.W., Blanco M.T., Alkali activated fly ashes: a cement for the future, *Cem. Concr. Res.* 29: 1323–1329, 1999.
- [8] Duxon P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L., Luckey G.C., Palomo A., Van Deventer J.S.J., Geopolymer technology: the current state of the art, *J. Mater. Sci.* 42: 2917–2933, 2007.
- [9] Fernandez-Jimenez A., Palomo A., Characterization of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements, *Fuel*, 82: 2259–2265, 2003.
- [10] ASTM C618-12a: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, 2012.
- [11] Fernandez-Jimenez A., Palomo A., Criado M., Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model, *Cem. Concr. Res.* 35: 1204–1209, 2005.
- [12] Criado M., Palomo A., Fernandez-Jimenez A., Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products, *Fuel*, 84: 2048–2054, 2005.
- [13] Kovalchuk G., Fernandez-Jimenez A., Palomo A., Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development – Part II, *Fuel*, 86: 315–322, 2007.
- [14] Criado M., Fernandez Jimenez A., Palomo A., Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description, *Fuel*, 89: 3185–319, 2010.
- [15] Djwantoro H., Wallah S.E., Sumajouw M. J., Rangan B., On the Development of Fly Ash-Based, Geopolymer Concrete, *ACI Mater. J.*, V. 101, No. 6, November-December 2004.
- [16] Fernandez-Jimenez A., Garcia-Lodeiro I., Palomo A., Durability of Alkali-Activated Fly Ash Cementitious Materials, *J. Mater. Sci.*, 42-3055-3065, 2007.
- [17] SRPS EN 450-1:2010, Fly ash for concrete – Part 1: Definition, specifications and conformity criteria, European standard norme, 2010.
- [18] SRPS EN 196–1:2008, Metode ispitivanja cementa – Deo 1: Ispitivanje čvrstoće, 2008.
- [19] Komljenović M., Bašcarević Z., Bradić V., Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers, *J. Hazard. Mater.* 181: 35–42, 2010.
- [20] Fernandez-Jimenez A., Palomo A., Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: effect of the activator, *Cem. Concr. Res.* 35: 1984–1992, 2005.
- [21] Fernandez-Jimenez A., Palomo A., Sobrados I., Sanz J., The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes, *Micropor. Mesopor. Mat.* 91: 111–119, 2006.
- [22] Fawer M., Concannon M., Rieber W., Life cycle inventories for the production of sodium silicates, *Int. J. LIFE CYCLE ASS.*; 4(4):207–12, 1999.